長谷川　洋

4) 池田，長谷川，伊藤，日本理学会金沢(1974，4月) 予稿集(物基，統力).

乱流プラズマの異常輸送現象

東大理　一丸節夫

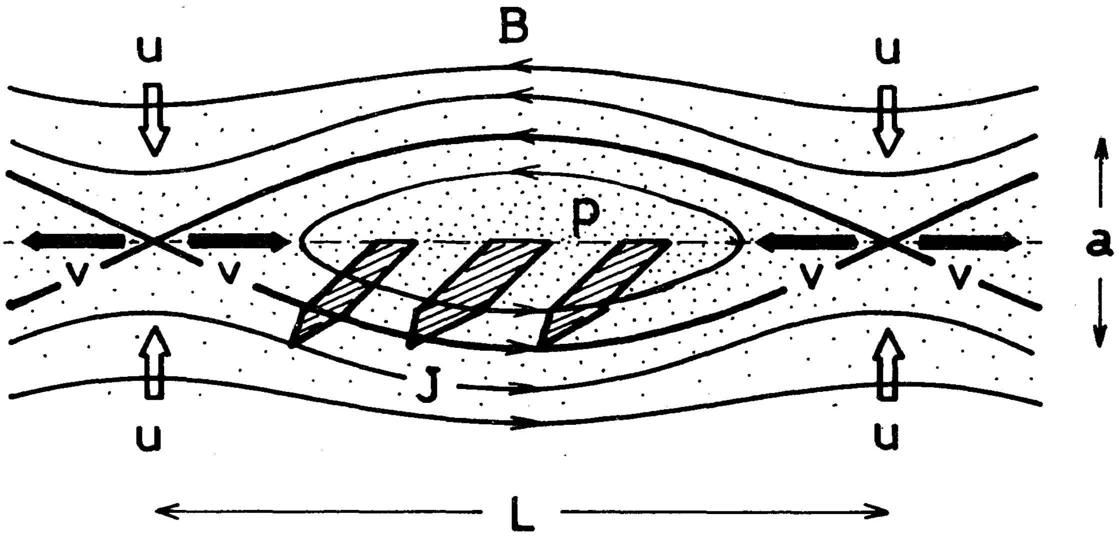
乱流状態にあるプラズマの輸送現象を，正確に記述する表式を導出することは，プラズマ理論の中心課題の一つである。一方，自然現象あるいは実験結果の解析を通じて，このようなプラズマの輸送現象について，いくつかの経験則が知られている。以下ではこれらの経験則と，その理論的解析に焦点をあわせて考える。

電流シートが作りだす，互に逆向きの磁場の配位は，プラズマの導電率が有限であるため，抵抗損失により消散する。これは，互に逆向きの磁力線が，電流のつくる中性面で再結合するとみなしてもよい。このような磁場の再結合率(reconnection rate)を評価することは，太陽のフレアや地球磁気圏のプラズマ現象等にも関連して，重要である。Parker は[1]，太陽や地球での観測結果から，再結合速度 u は，普遍的に Alfven 速度 V_A 1/10 位の値をとるべきものである，と推論した(u の定義等については第1図を参照)。この経験則は，あきらかに，粒子間の衝突頻度には無関係の形をしており，従来の古典論的な理論結果[2,3]と相反するものである。

このように，輸送係数が，古典的なクーロン散乱の頻度に無関係な値をとるということは，乱流プラズマ中の輸送現象に共通の特質のようである。Buneman resistivity[4]や Bohm diffusion[5]はこの代表的な例であり，これらの異常輸送現象は，実効的な衝突頻度を $\tilde{\nu} = \alpha\,\omega_c$ なる形で表すことができる。こゝで，α (≤ 1) は普遍定数，また ω_c は現象に固有の(集団運動の)周波数である。

この講演では，Bunaman resistivity と磁場の再結合率に，問題をしぼる。(Bohm diffusion については文献6を参照) したがって，乱流プラズマの直流電気伝導度を取扱うことになる。

プラズマを構成する成分(電子，イオンなど)を添字 s で区別すると，一様な系での運動量に関する方程式は，



第１図　中性面内での磁場の再結合

$$\vec{E} + \frac{1}{c}\vec{V}_s \times \vec{B} - \frac{m_s}{q_s}\frac{d\vec{V}_s}{dt} = -\frac{1}{q_s n_s}\sum_{\vec{k}} \int d\omega \frac{\vec{k}}{\omega} < \vec{j}_s \cdot \vec{e}^{\,*}(\vec{k},\omega) >, \quad (1)$$

とかける。[7]　こゝで，qは電荷，mは質量，nは平均数密度，$\vec{V}$ は平均流速，$\vec{E}$ は $\vec{B}$ は巨視的な電磁場を表し，

$$< \vec{j}_s \cdot \vec{e}^{\,*}(\vec{k},\omega) > = \frac{1}{2\pi}\int d\vec{r} \int_{-\infty}^{\infty} d\tau < \vec{j}_s(\vec{r},\tau) \cdot \vec{e}\,(0,0) > \exp\left[-i(\vec{k}\cdot\vec{r} - \omega\tau)\right] \quad (2)$$

は，揺動電場 $\vec{e}\,(\vec{r}\,,\,t)$ と s 種の粒子による揺動電流 $\vec{j}_s(\vec{r},t)$ の相関函数である。

乱流プラズマでは，spontaneous effect を無視し，induced effectのみを考えてよいので，$\vec{j}_s(\vec{k},\omega) = \overleftrightarrow{\kappa}_s(\vec{k},\omega)\cdot\vec{e}(\vec{k},\omega)$ とおく。直流導電率 σ は，(1)式から

$$\frac{1}{\sigma} = -\frac{1}{q_s^2 n_s^2 V_s}\sum_{\vec{k}}\int d\omega \frac{k_{\parallel}}{\omega}\overleftrightarrow{\kappa}_s(\vec{k},\omega) : < \vec{e}\,\vec{e}^{\,*}(\vec{k},\omega) > \quad (3)$$

となる。但し，$k_{\parallel}$ は $n_s q_s \vec{V}_s$ 方向の波数ベクトルの成分であぬ。こゝで導入された $\overleftrightarrow{\kappa}_s(\vec{k},\omega)$ は ac の導電率テンソルであるが，それは total field に対する応答函数として定義されており，，その特異点は，系の集団運動に対応する乱流スペクトル$< \vec{e}\,\vec{e}^{\,*}(\vec{k},\omega) >$ の特異点とは，関係がない。

Buneman resistivity は，電子・イオン間の二流不安定性[8]によるものであり，電場揺動のテンソル$< \vec{e}\,\vec{e}^{\,*}(\vec{k},\omega) >$ も縦波的になる。二流不安定性の解析結果を

(3)式に適用すると,

$$\sigma = \frac{1}{3^{3/2}\, 4\pi\varepsilon} \left(\frac{2m_i}{m_e}\right)^{1/3} \omega_p \tag{4}$$

すなわち, $\tilde{\nu} = 3^{3/2}\,\varepsilon\,(m_e/2m_i)^{1/3}\,\omega_p$ が得られる。[7] こゝで, $\omega_p = (4\pi ne^2/m_e)^{1/2}$, また

$$\varepsilon \equiv \langle \delta n^2 \rangle / n^2 \tag{5}$$

は, 密度揺動のレベルを表す無次元量である。実験結果は,[4] (4) 式で $\varepsilon \simeq 1/25$ としたものである。

磁場の再結合については, 第1図で考える。X型の磁場の中性点はそれ自体不安定で, 結合速度 u に伴って, v なる速度でプラズマを中性面内に放出する。圧力のバランスの考察から, $v \simeq V_A$ であるので [1], 中性面内のプラズマは電磁流体力学的な乱流状態にある。それに附随した磁場の乱れは, 電流を散逸させ, 直流導電率を減少させる。したがって, このモデルによると, 問題はまず, 横波的な電磁流体力学的乱流場における直流導電率を計算することに帰着する。そのような乱流場の代表的な波数を $\langle k \rangle$ とすると, (3)式から

$$\frac{1}{\sigma} = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2} \frac{\varepsilon B^2}{3nm(T/m)^{1/2} c^2 \langle k \rangle} \tag{6}$$

が得られ, 再結合速度は

$$u \simeq \frac{\pi^{1/2}}{3} \frac{\varepsilon}{\langle k \rangle a} V_A \tag{7}$$

となる [7]。こゝで,

$$\varepsilon \equiv \langle \delta B^2 \rangle / B^2 \tag{8}$$

は, 再結合する磁場の強さBに対する中性面内の磁場のゆらぎ δB を表す無次元量である。$\langle k \rangle a \gtrsim 1$ であるから, $\varepsilon \simeq 1$ ならば, (7)式は Parker の経験則と一致する。$\varepsilon \simeq 1$ は, 再結合磁場と磁場のゆらぎの間のエネルギー等合配を意味し, これに(7)式の導出に用いたプラズマと再結合磁場ちのエネルギー等分配の関係式を考えあわせると, 再結合磁場, 揺動磁場, プラズマの三成分間に等分配則が成立していることが示唆されている。

参 考 文 献

1) E.N. Parker, Astrophys. J. 180 (1973), 247.

2) E.N. Parker, J. Geophys. Res. 62 (1957), 509 ; Astrophys. J. Suppl. 8 (1963), №77.

3) H.P. Furth, J. Killeen, and M.N. Rosenbluth, Phys. 6 (1963), 459.

4) S.M. Hamberger and J. Jancarik, Phys. Fluids 15 (1972), 825.

5) D. Bohm, in "The Characteristics of Electric Discharges in Magnetic Fields", ed. by A. Guthrie and R.K. Wakerling (McGraw Hill, New York, 1949), Chap. 2, Sec. 5.

6) S. Ichimaru and M.N. Rosenbluth, Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (IAEA, Vienna, 1971) Vol. Ⅱ, p. 373 ; S. Ichimaru and T. Tange, J. Phys. Soc. Japan 36 (1974) 603 ; S. Ichimaru, "Basic Princics of Plasma Physics" (Benjamin, Reading, Mass., 1973), Chap. 11.

7) S. Ichimaru, "Electric Resistivity of Electromagnetically Turbulent Plasma and Reconnection Rate of Magnetic Fields", Plasma Theory Group Preprint №10, to be published.

8) O. Buneman, Phys. Rev. 115 (1959), 503.

不 安 定 系 の 確 率 過 程 ― 臨 界 点 近 傍 で の Gunn Instability

日電中研　中 村 紀 一

不安定系は熱平衡と異なる統計的性質をもっと考えられる。その確率過程が何であるかを探るのが我々の目的である。乱流は典型的な実例であるが，最近ではレーザー[1)]，ベナール渦[2)]の問題が非平衡系での相転移と云う観点から研究されている。Pytte と Thomas[3)]はGa As のような負性抵抗を示す半導体で誘電率の周波数および電界依存性